ChinaXiv合作期刊

第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

不同人工林对奈曼沙区土壤团聚体的影响

吴 际[1], 杨 光[1], 韩雪莹[1], 温雅琴[2],
杨溢文[3], 李文龙[4], 刘 一[5]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 呼和浩特市水资源与河湖保护中心,内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 内蒙古自治区林业科学研究院草原研究所,内蒙古 呼和浩特 010020; 4. 中国农业科学院草原研究所,内蒙古 呼和浩特 010010; 5. 呼伦贝尔市水利事业发展中心,内蒙古 呼伦贝尔 021100）

摘 要： 为分析奈曼沙区不同人工林土壤团聚体组成及其稳定性变化,从中筛选最佳水土保持与防风固沙林型。以奈曼沙区杨树、油松和樟子松人工纯林林下土壤为研究对象,通过干筛和湿筛的方法,研究0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层土壤团聚体的组成,以土壤稳定性指标来评价土壤状况。结果表明:(1) 3块人工林林下土壤大团聚体的含量在干筛和湿筛的结果中差异较大,其土壤结构体破碎率(PAD)值进一步说明水稳定性团聚体在反映奈曼沙区人工林土壤团聚体稳定性中更具有代表性,且2种筛分条件下,0~20 cm土层土壤>0.25 mm团聚体的含量($R_{>0.25}$)显著高于40~60 cm土层。(2) 结合不同人工林对土壤团聚体$R_{>0.25}$、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)值的表现,樟子松土壤结构性最好,其水稳定性最高,D值相对较低。(3) 土壤团聚体直径值和分形维数D值与各粒径含量呈明显的线性关系,但是相关系数正负临界点不同,2 mm与0.25 mm粒级是土壤团聚化过程中的分界线,可分别作为表征土壤机械稳定性、水稳定性的直观参数。综合试验结果表明,对于生态脆弱的奈曼沙区种植樟子松可以有效改善土壤结构,适宜在该地固沙工作中推广。

关键词： 奈曼沙区; 人工林; 土壤团聚体; 团聚体稳定性

土壤团聚体是土壤结构的基本单元[1],它的形成过程非常复杂,主要受胶结物质数量和性质的影响。土壤团聚体的数量和质量影响着土壤的保水保肥和透气能力,良好的土壤团聚体可以提升土壤生产力,提高土壤抗蚀性,降低水土流失的风险[2],因此通常把土壤团聚体的稳定性作为评价土壤质量的关键性指标[3]。土壤团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持其原有形态的能力[4],主要包含机械稳定性和水稳定性。目前,评价团聚体稳定性的指标主要有>0.25 mm团聚体的含量($R_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)[5]、土壤结构体破碎率(PAD)等。

近年来,稳定团聚体保持对土壤结构退化、土壤水分保持和植被动态之间的相互影响得到了广泛的关注[6]。研究结果表明,在生态脆弱的干旱半干旱地区,水分利用和土壤风蚀是影响表层土壤团聚体稳定性的重要因素,土壤团聚性差、水稳定性差导致土壤结构退化,风蚀会进一步降低结构稳定性,形成恶性循环[7]。因此,如何高效管理和利用土壤,促进优质团聚体的形成和保持,已成为干旱半干旱地区亟待解决的问题。

科尔沁沙地是中国面积最大的沙地,其土壤含水量较低,养分贫瘠,生态环境恶劣[8],受自然因素和人为因素影响,土地调控能力低,土壤水稳定性团聚体收支失衡,导致土壤的蓄水保墒能力严重不足[9]。近年来,人工植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响逐渐成为研究热点[10],贫瘠的沙地土壤经过人工植被的种植及管理措施,使得地上生物量增加、生物根系固定作用增强,土壤状况得到一定的改善[11]。奈曼旗为科尔沁沙地的核心区,是科尔沁沙地沙漠化发生、发展最典型的区域之一,无论是20世纪70年代的沙漠化速度还是90年代的沙漠化

收稿日期： 2022-02-01; **修订日期：** 2022-08-15
基金项目： 内蒙古自治区科技重大专项"沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范"(2019ZD003)
作者简介： 吴际(1997-),女,在读硕士研究生,研究方向为水土保持. E-mail: 871325864@qq.com
通讯作者： 杨光. E-mail: yg331@126.com

chinaXiv:202301.00142v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00142v1

逆转速度都具有代表性[12]。全旗沙漠化土地面积占到土地总面积的一半以上，不同程度的沙漠化土地在境内均有分布[13]，故本文将奈曼旗全境作为沙漠化研究地区，称为奈曼沙区。土地沙化、植被退化，一直是制约沙区发展的主要因素，强烈的风蚀带走了土壤中大量的细颗粒物质，土壤养分流失、稳定性破坏，人工植被建设是沙区治理土地沙化、水土流失最常见和最有效的方法之一，不仅可以减小风蚀、固定流沙，还可以促进土壤颗粒通过有机质胶结作用形成大团聚体，增加土壤稳定性。研究表明，不同树种因根系作用、枯落物性质和林下植被状况不同而导致土壤性质具有较大差异，土壤团聚体特征集中反映了这种综合作用的结果[14-16]。由此可见，研究不同人工林林下土壤团聚体的组成及稳定性对揭示奈曼沙区植被恢复过程中土壤与植被发育过程的相互关系、土壤稳定性团聚体形成与转化规律具有重要意义。本文选取的杨树、油松、樟子松人工林因其良好的耐寒、耐旱性，自70年代开始在奈曼沙区作为主要的防风固沙树种进行集中大量种植，并且取得了较好的成果，成为目前最适宜的沙地造林树种[17-19]。

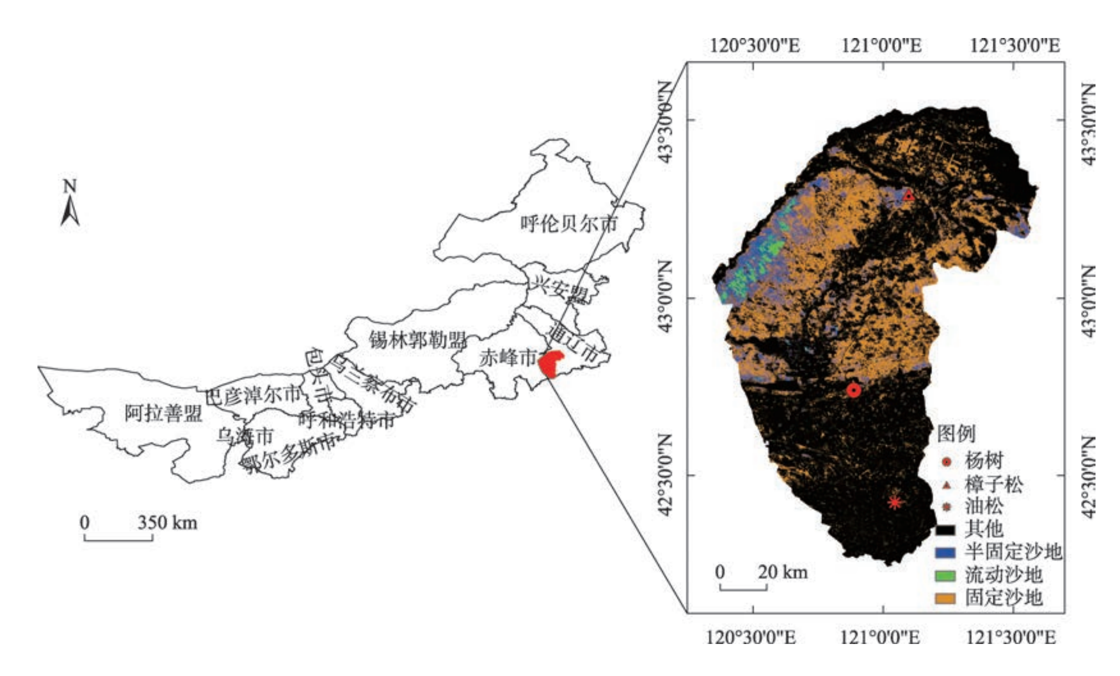
1　研究区概况

研究区位于科尔沁沙地南缘的奈曼旗(图1)，地理位置为42°14′175″~43°32′14″N，120°20′35″~121°36′00″E，气候类型为北温带大陆性季风干旱气候，年平均气温6.0~6.5 ℃，年平均降水量约360 mm，年平均蒸发量1935 mm，干燥度为1.4~1.8，年平均风速3.5 $m\cdot s^{-1}$，冬春季盛行西北风，春季风蚀活动强烈，全年平均风速可达4.3 $m\cdot s^{-1}$，吹沙日20~30 d[20]。研究区地带性土壤为栗钙土，由于地质历史年代沉积了丰富而松散的地表沙质沉积物，在风力吹扬作用下形成了沙地，受风蚀作用的影响，部分变为固定风沙土和栗钙型风沙土[21]，特点是养分含量低，保水保肥性能差[22]。沙质属性决定了土壤易遭受风蚀，储存雨水及营养物质能力差，土壤有机质含量为5.6~9.86 $g\cdot kg^{-1}$，土壤pH为7.25。

2　研究方法

2.1　试验设计

对沙区进行全面考察，了解造林时段、政策以及林木价格等历史背景后，并对多个林场进行对比，以人工林种植规模大且存活率较高、可供试验研究的新镇林场、青龙山林场以及兴隆昭林场3个国有林场为采样点，分别选取了分布比较集中、林龄成熟的杨树、油松及樟子松人工纯林为研究对象，起始立地条件均为相对一致的流动沙地地段，常见经营规格为株距2~3 m、带宽5~7 m，带间土地



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，对底图边界无修改。

图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Diagram of the study area

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00142v1

均为未经开垦的天然植被恢复状态,并且将沙地完全固定,土壤类型为栗钙型风沙土。试验设置3个处理,每个处理设置3次重复,通过干筛和湿筛土壤团聚体,对比分析不同植被恢复人工林土壤稳定性,从而为筛选最佳的固沙人工林提供依据。

2.2 土壤取样

于2021年6月在每块林地中设置30 m×30 m的乔木样方,同一样地沿对角线选取3个代表性样点(即重复),每样点分别挖取剖面,按0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm的土层自下而上分别采集原状土壤样品1 kg置于塑料盒,原状土壤在采集和运输过程中避免挤压和颠倒,以免破坏团聚体,用硬质塑料盒带回实验室。在室温条件下进行风干,并且剔除植物根系和石砾等杂质,风干后沿自然裂缝将大块土掰开,过孔径10 mm筛,并进行土壤团聚体的测定。

2.3 团聚体处理

干筛处理:按照四分法原则取土样100 g,置于孔径自上而下为:2 mm、0.25 mm、0.053 mm的电动振筛机,以固定频率震荡筛分(300次·min^{-1})5 min,分别得到>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm的4种粒级的团聚体,并计算其百分比[23]。

湿筛处理:将50 g风干土样用纯水浸泡12 h,然后自上而下放入3个不同粒级(2 mm、0.25 mm、0.053 mm)的筛子中。利用土壤团聚体分析仪(XY-100)在纯水环境中(振幅4 cm,频率30次·min^{-1})上下摇动进行湿筛,以获得>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm和<0.053 mm的4种粒级的团聚体,将获得的不同粒级的团聚体进行干燥处理(50 ℃)并称重[24]。

2.4 数据处理与统计分析

> 0.25 mm团聚体的含量($R_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤结构体破碎率(PAD)和分形维数(D)计算公式如下[25]:

$$R_{>0.25}=\frac{M_{>0.25}}{M_T}\times 100\% \quad (1)$$

式中:M_T表示团聚体总重量;$M_{>0.25}$表示粒级>0.25 mm的团聚体的重量[26]。

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}\overline{x}_i\omega_i \quad (2)$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left(\sum_{i=1}^{n}\omega_i\ln\overline{x}_i\right) \quad (3)$$

$$\lg\left[\frac{M\left(r<\overline{x}_i\right)}{M_T}\right]=(3-D)\lg\left(\frac{\overline{x}_i}{x_{\max}}\right) \quad (4)$$

式中:n表示团聚体粒级的分组数;$\overline{x}_i$表示第i粒级团聚体的平均直径;ω_i表示第i粒级团聚体质量百分比;r表示测量团聚体直径大小的码尺。

$$\mathrm{PAD}=\frac{>0.25\ \text{mm团粒(干筛}-\text{湿筛)}}{>0.25\ \text{mm团粒(干筛)}}\times 100\% \quad (5)$$

数据的处理采用Excel 2016软件计算平均值及标准差,数据表达形式为平均值±标准差,利用SAS 9.4软件对不同数据组进行方差分析(One-way ANOVA)、趋势检验,用Pearson法进行相关性分析,运用Excel 2016软件绘制分析图。

3 结果与分析

3.1 不同人工林土壤团聚体组成分析

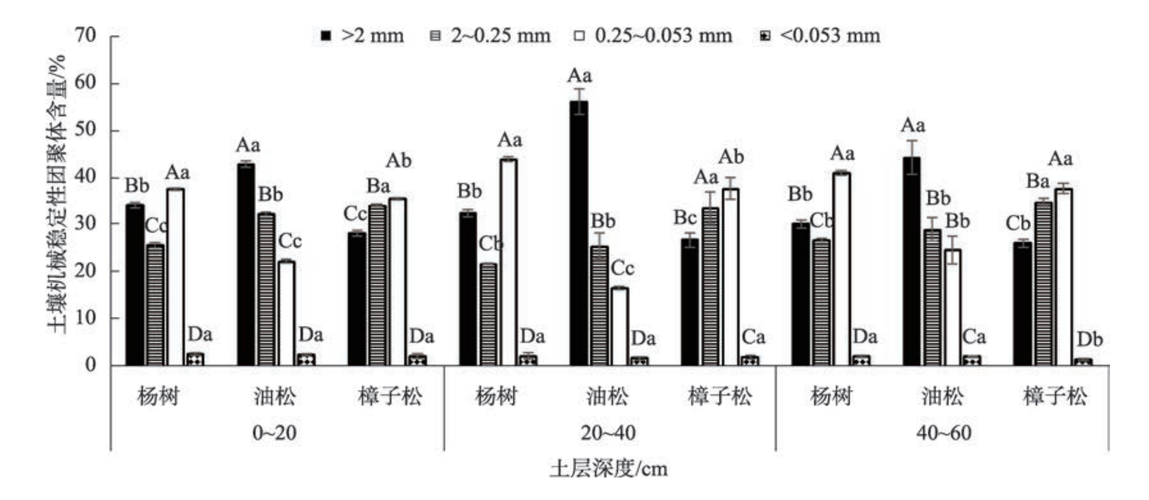
由干筛法获得的机械稳定性团聚体组成见图2。3块人工林不同土层粒级含量的变化趋势一致。杨树人工林随着粒级的减小团聚体含量呈现出先减后增的趋势,其中含量最多的是0.25~0.053 mm粒级团聚体,显著高于其他粒级;油松人工林随着粒级的减小团聚体含量呈现递减的趋势,>2 mm粒级团聚体含量显著高于其他粒级;樟子松人工林则是随着粒级的减小团聚体含量先增加后减少,最小的粒级含量最少,为3%,0.25~0.053 mm粒级团聚体含量最高。整体上,>2 mm粒级团聚体表现为:油松>杨树>樟子松,2~0.25 mm粒级团聚体表现为:樟子松>油松>杨树。由此可知,干筛条件下,机械稳定性大团聚体的形成与保持能力表现为:油松>樟子松>杨树。

由图3可知,与干筛相比,>2 mm和<0.053 mm 2个粒级的团聚体含量有了明显的变化。3块人工林>2 mm粒级的团聚体含量随着土层的加深显著性减小,4个粒级团聚体含量中最大的为<0.053 mm粒级团聚体。整体上,>2 mm粒级团聚体含量表现为:樟子松>杨树>油松,2~0.25 mm粒级团聚体含量表现为:樟子松>油松>杨树,水稳定性大团聚体的形成与保持能力表现为:樟子松>油松>杨树。

3.2 不同人工林土壤团聚体稳定性分析

分析不同人工林土壤机械稳定性的特征指标发现(表1),对于不同土层的MWD和GMD值来说,0~20 cm土层的杨树显著高于其他2个土层,20~40 cm土层的油松显著高于其他2个土层,樟子松则无显著差异,不受土层的影响;利用回归分析计算不

ChinaXiv合作期刊



注:大写字母表示同一土层同一树种不同粒径团聚体含量差异显著($P<0.05$),小写字母表示同一土层不同树种相同粒径团聚体含量差异显著($P<0.05$)。下同。

图2　土壤机械稳定性团聚体组成

Fig. 2　Soil mechanical stability of the aggregate composition

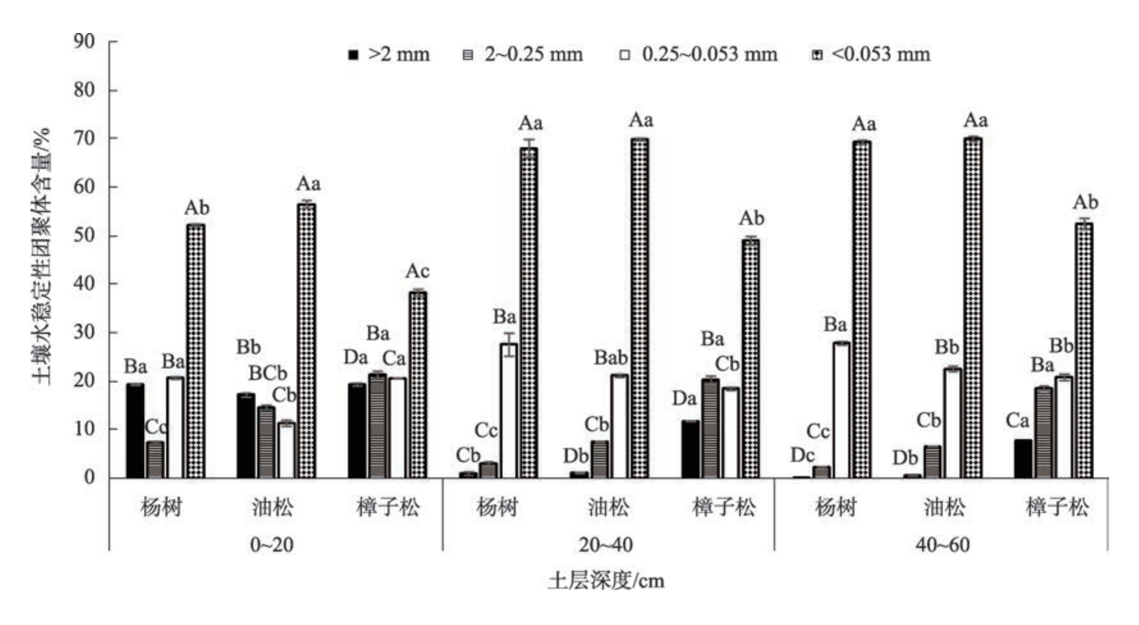


图3　土壤水稳定性团聚体组成

Fig. 3　Soil water stability aggregate composition

同人工林土壤团聚体的分形维数(D)值可以看出,不同林型及土层均无明显差异;>0.25 mm团聚体的含量($R_{>0.25}$)作为重要指标可定量评价土壤团聚体结构的稳定性[27],其值越大,说明土壤的抗蚀性越好,在干筛条件下其土层变化趋势与MWD和GMD一致,各个土层中$R_{>0.25}$值表现为:油松>樟子松>杨树。整体上看,在各个土层中,油松的MWD和GMD值最高,樟子松与杨树之间则无显著差异,D值无明显差异,油松的$R_{>0.25}$值最高。

分析不同人工林土壤团聚体水稳定性的特征指标发现(表2),0~20 cm土层的3个林型的GMD、MWD、$R_{>0.25}$值显著高于20~40 cm和40~60 cm土层,D和PAD值显著低于20~40 cm和40~60 cm土层,说明这5个指标受土层影响显著;3个林型的GMD、MWD值表现为:樟子松>油松=杨树;在0~20 cm土层处$R_{>0.25}$值最高,表现为:樟子松>油松>杨树;从分形维数D的数据可以看出,0~20 cm土层樟子松的D值最低,与其他2个树种有显著差异;破碎率PAD是湿筛后破碎的团聚体比率,其数值越小,土壤结构越稳定[28],从表2可以看出,不同人工林的PAD值表

ChinaXiv合作期刊

表1 不同人工林土壤机械稳定性参数

Tab. 1 Different plantation soil mechanical stability parameters

土层/cm(干筛)	林型	稳定性参数			
		GMD	MWD	D	$R_{>0.25}$
0~20	杨树	0.85±0.01 Ab	2.40±0.03 Ab	2.3799±0.01 Aa	59.79±0.22 Ac
	油松	1.33±0.03 Ba	2.96±0.04 Ba	2.3553±0.01 Aa	75.05±0.37 Ba
	樟子松	0.81±0.03 Ab	2.13±0.04 Ab	2.3433±0.03 Aa	62.24±0.50 Ab
20~40	杨树	0.74±0.04 Bb	2.26±0.04 Bb	2.3507±0.04 Aa	54.20±0.58 Ac
	油松	1.42±0.10 Aa	3.68±0.13 Aa	2.3117±0.03 Aa	81.51±0.55 Aa
	樟子松	0.77±0.01 Ab	2.04±0.06 ABb	2.3309±0.03 Aa	60.29±0.60 Ab
40~60	杨树	0.75±0.01 Bb	2.17±0.05 Bb	2.3475±0.01 Aa	56.82±0.55 Bc
	油松	1.33±0.15 Ba	3.01±0.20 Ba	2.3286±0.01 Aa	73.16±0.42 Ba
	樟子松	0.77±0.02 Ab	2.02±0.05 Ab	2.3118±0.02 Aa	60.83±0.72 Ab

注：大写字母表示相同树种不同土层差异显著($P<0.05$)，小写字母表示相同土层不同树种差异显著($P<0.05$)。下同。

表2 不同人工林土壤水稳定性参数

Tab. 2 Soil water stability parameters of different plantations

土层/cm(湿筛)	林型	稳定性参数				
		GMD	MWD	D	$R_{>0.25}$	PAD
0~20	杨树	0.14±0.01 Ab	1.29±0.03 Ab	2.89±0.01 Ba	26.97±0.64 Ac	0.55±0.11 Ba
	油松	0.14±0.01 Ab	1.23±0.05 Ab	2.90±0.01 Ba	32.03±1.09 Ab	0.57±0.01 Ba
	樟子松	0.24±0.01 Aa	1.45±0.02 Aa	2.83±0.01 Bb	40.93±0.28 Aa	0.34±0.06 Bb
20~40	杨树	0.05±0.01 Bb	0.16±0.04 Bb	2.93±0.01 Aa	4.35±0.26 Bc	0.94±0.02 Aa
	油松	0.06±0.01 Bb	0.21±0.01 Bb	2.94±0.01 Aa	8.88±0.02 Bb	0.89±0.01 Ab
	樟子松	0.15±0.01 Ba	0.99±0.01 Ba	2.87±0.01 Ab	32.4±0.06 Ba	0.46±0.01 Ac
40~60	杨树	0.04±0.01 Bb	0.10±0.01 Bc	2.94±0.01 Aa	2.71±0.16 Bc	0.95±0.0.1 Aa
	油松	0.05±0.01 Bb	0.17±0.01 Bb	2.94±0.01 Aa	7.42±0.25 Bb	0.90±0.01 Ab
	樟子松	0.12±0.01 Ba	0.73±0.01 Ca	2.88±0.01 Ab	26.56±0.21 Ca	0.56±0.01 Ac

现为：杨树>油松>樟子松，说明樟子松人工林土壤团聚体最稳定。

3.3 土壤团聚体组成与稳定性参数的相关性

由表3和表4可知，机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的直径指标MWD、GMD与分形维数D的相关性系数分别在−0.33~−0.32、−0.97~−0.80之间，呈显著负相关关系，说明土壤团聚体的MWD和GMD值越大，D值越小。对于机械稳定性团聚体，<0.053 mm、0.25~0.053 mm、2~0.25 mm 3个粒级的机械稳定性团聚体与直径指标均呈负相关(除<0.053 mm粒级外，其他均达到显著相关)，>2 mm粒级的机械稳定性团聚体与MWD值的相关系数为

表3 机械稳定性团聚体组成与稳定性参数的相关性

Tab. 3 Correlation between mechanical stability aggregate composition and stability parameters

干筛	<0.053 mm	0.053~0.25 mm	0.25~2 mm	> 2 mm	MWD	GMD	D
<0.053 mm	1						
0.053~0.25 mm	0.02	1					
0.25~2 mm	−0.12	−0.1	1				
>2 mm	−0.01	−0.88**	−0.39*	1			
MWD	−0.03	−0.91**	−0.32*	0.99**	1		
GMD	−0.08	−0.45*	−0.61**	0.72**	0.69**	1	
D	0.97**	0.2	0.1	−0.14	−0.33*	−0.32*	1

注：*表示相关性达到显著水平($P<0.05$)，**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)。下同。

chinaXiv:202301.00142v1

ChinaXiv合作期刊

表4 水稳定性团聚体组成与稳定性参数的相关性

Tab. 4 Correlation between water stability aggregate composition and stability parameters

湿筛	<0.053 mm	0.053~0.25 mm	0.25~2 mm	>2 mm	MWD	GMD	D
<0.053 mm	1						
0.053~0.25 mm	0.38*	1					
0.25~2 mm	−0.85**	−0.58**	1				
>2 mm	−0.85**	−0.63**	0.64**	1			
MWD	−0.81**	−0.69**	0.68**	0.94**	1		
GMD	−0.97**	−0.49**	0.82**	0.90**	0.87**	1	
D	0.99**	0.39*	−0.88**	−0.82*	−0.80**	−0.97**	1

0.99,与GMD值的相关系数为0.72,呈极显著相关,正负相关性以2 mm为界。对于水稳定性团聚体,<0.053 mm与0.25~0.053 mm 2个粒级的土壤团聚体与直径指标均呈负相关,且相关性极显著,而2~0.25 mm与>2 mm 2个粒级的水稳定性团聚体与直径指标均呈显著正相关,正负相关性以0.25 mm粒级团聚体为界。

对于机械稳定性团聚体,其D值与<0.053 mm粒级机械稳定性团聚体呈正相关关系,且相关性显著,与0.25~0.053 mm、2~0.25 mm、>2 mm 3个粒级机械稳定性团聚体无显著相关关系,其正负以2 mm为界。对于水稳定性团聚体,D值与<0.053 mm、0.25~0.053 mm粒级水稳定性团聚体呈显著正相关关系,而与2~0.25 mm、>2 mm粒级水稳定性团聚体呈显著负相关关系,正负以0.25 mm粒级团聚体为界。

4 讨论

良好的土壤结构需要有较高质量的土壤团聚体和适当的粒径分配,尤其是水稳定性团聚体的数量和稳定性[29]。本研究采用干、湿筛法,对科尔沁沙地奈曼沙区不同人工林土壤团聚体进行分析,2种筛分方法在土壤团聚体处理过程中各有优缺点,2种方法测定土壤团聚体的组成和稳定性不同,这主要是因为干筛法反映了原状土中非水稳定团聚体和水稳定团聚体的总体情况,体现的是土壤团聚体抵抗机械外营力破坏的能力[30],而湿筛法反映了土壤中水稳性团聚体的分布,湿筛后土壤中的非水稳定团聚体容易通过外力(水)的挤压而破碎成较小的团聚体。因此,水稳定性团聚体在反映科尔沁沙地奈曼沙区人工林团聚体稳定性中更具有代表性。

通过干筛法获得>2 mm及2~0.25 mm粒级土壤机械团聚体的百分含量能够达到50%以上,变化依次是:油松>樟子松>杨树,而经过水筛后>2 mm及2~0.25 mm粒级大团聚体遇到水分会使土壤团聚体崩解,导致水稳定性团聚体含量集中在<0.053 mm粒级范围内,水稳定性大团聚体表现为:樟子松>油松>杨树。总体来说,杨树林下土壤团聚体的稳定性最差,杨树本身是喜光、喜湿的树种,在干旱的沙地环境下生长发育无法满足自身水肥等需求,导致林下土壤质量较差;干筛条件下油松林下土壤大团聚体较多,在沙质地表植物根系及降雨作用下,土壤结构疏松,土壤颗粒是分散的,干燥后由于其黏聚作用,土壤表面变得坚硬,导致土壤硬化、板结,经过湿筛后大团聚体大幅度减小,说明其抗雨水浸泡、破坏能力差,在苏永中等[31]研究中也表明,即使是干旱地区的沙质土壤,也会在碳酸钙的表面聚集作用下结块,遇水冲击后又易分散。由此可见,固定沙地樟子松林下土壤稳定性较好,能够有效富集土壤水分和养分。综合干筛、湿筛2个结果发现,樟子松和杨树0~20 cm土层>0.25 mm粒级团聚体含量最高,油松20~40 cm土层机械稳定性大团聚体最多,但0~20 cm水稳定性大团聚体含量最高,这说明沙地表层土壤有机质来源丰富且稳定,有利于表层土壤大团聚体的形成与保持,随着土层加深,腐殖质减少,进而影响有机质的含量和微生物的活性,降低了土壤团聚体的胶结效能,不利于形成团粒结构。PAD值与水稳定性大团聚体变化趋势基本一致,均表现为樟子松土壤抗蚀性及稳定性更好,其主要机制是干旱地区樟子松根系强壮发达、抗旱能力较强,根系对土壤有改良和固结作用,相比其他2个林型,樟子松有强壮发达的垂直水平根,根系的分泌物可以对土壤起到很好的胶结作用。水分是

chinaXiv:202301.00142v1

ChinaXiv合作期刊

影响大团聚体形成的重要因子，适量的水分能够较好地促进土壤团聚体的形成和保持[32]，然而在地下水埋深较浅的地方，干旱少雨的自然条件不会影响樟子松的生长和存活[33]，奈曼沙区当年降水除了满足樟子松的水分需求外，还对樟子松提供后续1~2 a生长的水分和养分供应[34]。

众多研究结果表明，土壤团聚体直径指标MWD和GMD值越大、分形维数D值越小，说明团聚体稳定性越好，团聚度越高[35]。通过本研究可以发现，干筛条件下，油松林下土壤中绝大多数是> 2 mm粒级的团聚体，其MWD和GMD值最大，相关性也表明MWD和GMD值与>2 mm粒级的团聚体含量有显著关系，但是湿筛条件下则是樟子松MWD和GMD值最大，这是因为油松>2 mm粒级的团聚体中包含大多数>5 mm粒级的土块，虽然这种大团聚体具有良好的抗土壤风蚀性，但它的稳定性并不高，从湿筛结果可以看出，这种大块团聚体遇水后的团聚体破坏率很高，且分形维数D>2.88，表现为保水保肥性差，遇水土壤板结，通透性差[36]。

相关性结果表明，机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的直径值和D值与各粒径团聚体含量之间均呈明显的线性关系，且正负分别以2 mm、0.25 mm粒级团聚体为界，说明土壤团聚化过程中尤为重要的分界线是2 mm和0.25 mm。>2 mm粒级团聚体所占比例越多，MWD、GMD越高，D值越小，机械稳定性越高；>0.25 mm粒级团聚体比例越多，MWD、GMD越高，D值越小，水稳定性越高，在沙漠化过程中伴随土壤表层细颗粒物质的损失，损失的是易蚀或者是可蚀部分，此分界线很好地反映土壤颗粒物质的损失情况，从而反映土地沙质荒漠化程度[37]。由此可见，土壤机械稳定性主要由2 mm粒级团聚体含量决定，土壤水稳定性主要由0.25 mm粒级团聚体含量决定，这与刘毅等[38]的研究结果相似，说明2 mm和0.25 mm粒级团聚体的构建在土壤团聚化过程中较敏感地影响了土壤团聚体的分形维数及结构特征，可分别作为表征土壤机械、水稳定性的直观参数。

5 结 论

（1）3块人工林林下土壤大团聚体的含量在干筛和湿筛结果中差异较大，其PAD值进一步说明水稳定性团聚体在反映科尔沁沙地奈曼沙区人工林土壤团聚体稳定性中更具有代表性，且2种筛分条件下，0~20 cm土层土壤>0.25 mm团聚体的含量（$R_{>0.25}$）显著高于40~60 cm土层。

（2）综合不同人工林对土壤团聚体$R_{>0.25}$、MWD、GMD、D值的表现，樟子松土壤结构性最好，其水稳定性最高，D值相对较低。

（3）机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的直径值、分形维数D值与各粒级含量呈明显的线性关系，其相关系数正负分别以2 mm、0.25 mm为界，说明2个粒级在土壤团聚化过程中是尤为重要的分界线，可分别作为表征土壤机械稳定性、水稳定性的直观参数。

参考文献（References）：

[1] 何绍浪, 黄尚书, 钟义军, 等. 耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 127−132. [He Shaolang, Huang Shangshu, Zhong Yijun, et al. Effect of tillage depth on the characteristics of soil water-stable aggregates in slopeing farmland of red soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 127−132.]

[2] 崔芯蕊, 张嘉良, 王云琦, 等. 甘肃小陇山林区不同林分对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 275−281. [Cui Xinrui, Zhang Jialiang, Wang Yunqi, et al. Effect of different forests on the soil aggregate stability in Xiaolongshan forest region of Gansu Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 275−281.]

[3] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3816−3824. [Luo Xiaohong, Wang Zifang, Lu Chang, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3816−3824.]

[4] 李越, 李航. 土壤团聚体稳定性的研究概述[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(11): 3245−3247. [Li Yue, Li Hang. The stability of soil aggregates: An overview[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(11): 3245−3247.]

[5] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340−347. [Qi Yingchun, Wang Yiquan, Liu Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 340−347.]

[6] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 46(9): 1841−1848. [Sun Tiancong, Li Shiqing, Shao Ming'an. Effects of long-term fer-

chinaXiv:202301.00142v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00142v1

tilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 46(9): 1841-1848.]

[7] 李小刚. 甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究[J]. 土壤学报, 2000, 53(2): 263-270. [Li Xiaogang. The characteristics of soil aggregate in Jingtai electricirrigating area of Gansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 53(2): 263-270.]

[8] 高亮, 高永, 王静, 等. 土地覆盖类型对科尔沁沙地南缘土壤有机碳储量的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1357-1364. [Gao Liang, Gao Yong, Wang Jing, et al. Impact of land cover change on soil carbon storage in the southern Horqin Sandy Land, Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1357-1364.]

[9] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征[J]. 水土保持学报, 2002, 15(1): 25-28, 115. [Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhang Tonghui, et al. Process and character of soil degradation of rainfed in farmland in Horqin Sandy Land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 15(1): 25-28, 115.]

[10] 丁杨, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土区不同林地土壤团聚体分形维数特征与土壤养分相关关系[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 42-46. [Ding Yang, Zhang Jianjun, Ru Hao, et al. Correlations of soil natrients and fractal dimension features of soil aggregates in different forestland in loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(4): 42-46.]

[11] 曹立悦. 种植年限对科尔沁沙地土壤团聚体及有机碳的影响[D]. 甘肃: 西北师范大学, 2021. [Cao Liyue. Effects of Cultivation Period on Soil Aggregate and Organic Carbon in Horqin Sandy Land[D]. Gansu: Northwestern Normal University, 2021.]

[12] 梅荣, 乌兰图雅. 基于遥感、GIS的旗县域土地利用变化研究——以内蒙古奈曼旗为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 81-84. [Mei Rong, Ulantuya. Research on land use change in County Region by remote sensing and GIS: A case study in Naiman in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(6): 81-84.]

[13] 包慧娟. 沙漠化地区可持续发展研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2004. [Bao Huijuan. Study on the Sustainable Development in the Sand-Desertification Region[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology), 2004.]

[14] 段而军, 于清. 黄土高原中部半湿润丘陵区不同树种林地土壤团聚特征的比较[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(21): 11355-11358, 11383. [Duan Erjun, Yu Qing. Comparison of soil aggregates characteristics in different tree species forests in semi-humid hilly region, central Loess Plateau[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(21): 11355-11358, 11383.]

[15] 董莉丽, 郑粉莉, 秦瑞杰. 基于LB法不同植被类型下土壤团聚体水稳性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 191-196. [Dong Lili, Zhang Fenli, Qin Ruijie. Study on effects of different vegetation types on soil aggregate water stability based on LB method[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 191-196.]

[16] 于法展, 张茜, 张忠启, 等. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 15-19. [Yu Fazhan, Zhang Qian, Zhang Zhongqi, et al. Effects of different type of forest vegetation on the soil distribution of soil aggregate and its organic carbon in Lushan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 15-19.]

[17] 刘立成. 通辽市人工林发展战略思考[J]. 内蒙古林业调查设计, 2012, 35(2): 48-52. [Liu Licheng. Reflections on the development strategy of plantation forests in Tongliao City[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2012, 35(2): 48-52.]

[18] 赵跃, 李爱国, 杨兴民, 等. 科尔沁沙地樟子松商品用材林造林技术和经济效益分析[J]. 内蒙古林业调查设计, 2015, 38(3): 59-61, 140. [Zhao Yue, Li Aiguo, Yang Xingmin, et al. Afforestation technology and economic benefit analysis of sassafras pine commercial timber forest in Horqin Sandy Land[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2015, 38(3): 59-61, 140.]

[19] 孙凤奎. 固沙造林目的树种的选择——兼谈乡土树种的利用[J]. 内蒙古林业, 1991, 36(2): 25-26. [Sun Fengkui. The selection of tree species for the purpose of sand fixation afforestation: Discussion on the utilization of indigenous tree species[J]. Inner Mongolia Forestry, 1991, 36(2): 25-26.]

[20] 连杰, 赵学勇, 王少昆, 等. 科尔沁沙地风蚀作用对土壤碳、氮分布的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 529-535. [Lian Jie, Zhao Xueyong, Wang Shaokun, et al. Impacts of wind erosion on the distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen in Horqin Sandy Land, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 529-535.]

[21] 郭佳佳. 奈曼旗兴隆沼林场土地沙漠化评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018. [Guo Jiajia. Land Desertification Evaluation of Xinglongzhao Forest Farm in Naiman Banner[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2018.]

[22] 曹立悦, 李玉霖, 詹瑾, 等. 开垦对科尔沁沙地土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 212-220. [Cao Liyue, Li Yulin, Zhan Jin, et al. Effects of tillage on distribution and stability of soil aggregates in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 212-220.]

[23] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3767-3775. [Fan Ruqin, Liang Aizhen, Yang Xueming, et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3767-3775.]

[24] 方薇. 植被恢复对滇东喀斯特坡地土壤团聚体稳定性的影响[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021. [Fang Wei. Effects of Vegetation Restoration on Soil Aggregate Stability in Karst Slope Land in Eastern Yunnan[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2021.]

ChinaXiv合作期刊

[25] 王凯, 那恩航, 张亮, 等. 阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 402-410. [Wang Kai, Na Enhang, Zhang Liang, et al. Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Funxin, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 402-410.]

[26] 方薇, 范弢. 滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 95-102, 132. [Fang Wei, Fan Tao. Differences in soil aggregate stability of different species of *Pinus yunnannesis* in karst mountain area of eastern Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 95-102, 132.]

[27] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: Ⅱ.A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042-1049.

[28] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 129-135. [Liu Wenli, Wu Jinggui, Fu Minjie, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregates fractions in orchards[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 129-135.]

[29] 胡旭凯, 陈居田, 朱利霞, 等. 干湿交替对土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 141-149. [Hu Xukai, Chen Yutian, Zhu Lixia, et al. Effect of dry-wet alternation on characteristics of soil aggregates[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(2): 141-149.]

[30] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228-231, 236. [Zheng Zicheng, Li Tingxuan, Zhang Xizhou, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 228-231, 236.]

[31] 苏永中, 王芳, 张智慧, 等. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征[J]. 中国农业科学, 2007, 48(4): 741-748. [Su Yongzhong, Wang Fang, Zhang Zhihui, et al. Soil properties and soil aggregate characteristics in marginal farmlands of oasis in middle Hexi Corridor region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 48(4): 741-748.]

[32] 李耸耸. 干旱对土壤团聚体稳定性的影响及其调控机制[J]. 草原与草业, 2022, 32(3): 12-14, 33. [Li Songsong. Review on effect of drought on soil aggregates stability and its biological regulation mechanism[J]. Grassland and Prataculture, 2022, 32(3): 12-14, 33.]

[33] 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 等. 不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 75-81, 86. [Zhao Youpeng, Meng Miaojing, Zhang Jinchi, et al. Relationship between soil aggregate stability and different forms of Fe and Al oxides in different forest types[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 75-81, 86.]

[34] Leffelaar P A. Water-movement, oxygen-supply and biological processes on the aggregate scale[J]. Geoderma, 1993, 57: 143-165.

[35] 宋立宁, 朱教君, 李明财, 等. 不同降水条件下科尔沁沙地南缘疏林草地樟子松针叶δ~(13)C和叶性状特征[J].应用生态学报, 2012, 23(6): 1435-1440. [Song Lining, Zhu Jiaojun, Li Mingcai, et al. Needles stable carbon isotope composition and traits of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sparse wood grassland in south edge of Keerqin Sandy Land under the conditions of different precipitation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1435-1440.]

[36] 刘新平, 何玉惠, 魏水莲, 等. 科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长对降水和温度的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 57-63. [Liu Xinping, He Yuhui, Wei Shuilian, et al. Growth response of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to precipitation and air temperature in the Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 57-63.]

[37] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 55(6): 877-881. [Zhao Wenzhi, Liu Zhimin, Cheng Guodong. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 55(6): 877-881.]

[38] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 73(1): 86-92, 100. [Liu Yi, Li Shiqing, Li Shengxiu. Fractal dimensions of soil aggregates under different environments in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2008, 73(1): 86-92, 100.]

chinaXiv:202301.00142v1

ChinaXiv合作期刊

Effects of different plantations on soil aggregates in the Nayman sand region

WU Ji[1], YANG Guang[1], HAN Xueying[1], WEN Yaqin[2],
YANG Yiwen[3], LI Wenlong[4], LIU Yi[5]

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
2. Hohhot Water Resources and River and Lake Protection Center, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China;
3. Inner Mongolia Autonomous Region Forestry Research Institute, Grassland Research Institute, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 4. Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 5. Hulunbuir Water Conservancy Development Center, Hulunbuir 021100, Inner Mongolia, China)

chinaXiv:202301.00142v1

Abstract: Abstract To analyze the composition of soil aggregates and their stability changes in different plantation forests in the Nayman sand region and to select the best forest type for soil and water conservation as well as wind and sand stabilization, the soil in the understorey of poplar, oil and camphor pine plantation forests in the Nayman sand region was used as the research object, and the composition of soil aggregates in the 0−20 cm, 20−40 cm, and 40−60 cm soil layers was investigated using dry and wet sieving methods, and the soil stability evaluation index was used to evaluate soil condition. The results showed that: (1) the content of large agglomerates in the three plantation sites differed significantly between the dry and wet sieve results. Their PAD values further indicated that water-stable agglomerates were more representative in reflecting agglomerate stabilty in plantation forests in the Nayman sand region, and the number of large agglomerates with $R_{>0.25}$ was significantly higher in the 0−20 cm soil layer than in the 40−60 cm under the two sieving conditions. (2) Combining the effects of different plantation forests on soil agglomerates MWD, GMD, D, and $R_{>0.25}$ values showed the best structural properties of camphor pine soils, which had the highest water stability and relatively low D values. (3) The soil agglomerate diameter index and the fractal dimension D are clearly linearly related to the content of each grain size, but the positive and negative thresholds of the correlation coefficients differ, indicating that the 2 mm and 0.25 mm grain classes are particularly important dividing lines in the soil agglomeration process, which can be used as intuitive parameters to characterize soil mechanical and water stability, respectively. The combined experimental results indicate that the planting of camphor pine in the ecologically fragile Nayman sand area can effectively improve the soil structure and is suitable for the extension in the sand consolidation work in this area.

Keywords: Nayman sand region; artificial forest; soil aggregate; aggregate stability